

caracterizar de manera adecuada los flujos y movimientos de las masas de agua.

Finalmente, el Lago Villarrica está, sin duda, sometido a un proceso de eutroficación cultural que avanza día a día, producto de un mal manejo de la cuenca. Un esfuerzo para frenar los efectos nocivos de este fenómeno debería sustentarse en estudios más profundos y en la aplicación herramientas como los Modelos de Simulación de Calidad de Aguas, ya que al otorgar una base científica a la discusión sobre el manejo del ambiente, ayudan en la gestión y la toma de decisiones.

11. BIBLIOGRAFÍA

1. Ambrose, R et al. (1993): The Water Quality Analysis Program, WASP5. Environmental Research Laboratory, Athens, Georgia.
2. Chapra, S (1996) Surface Water Quality Modeling, preliminary edition. McGraw-Hill.
3. DGA (1995): Hidrodinámica Preliminar del Lago Villarrica. Dpto. de Estudios y Planificación.
4. DGA-UACH (1994): Evaluación de la carga de nitrógeno y fósforo en el Lago Villarrica. Dpto. de Estudios y Planificación.
5. Fisher, H et al. (1979): Mixing in Inland and Coastal Water. Academic Press.
6. Hutter, K (1984): Hydrodynamics of Lakes. Instituto de Tecnología, Zurich. CISM, Udine, Italia.
7. Thomann, R y Mueller, J (1987): Principles of Surface Water Quality and Control. Harper&Row, Publishers, New York.
8. Vismara, R (1988): Ecología Aplicada. Hoepli, Milán.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XIV CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

PROGRAMA PUNTUAL DE DISEÑO: CORRESPONDENCIA ENTRE LA ESTIMACIÓN Y LA DISTRIBUCIÓN DE LA ALTURA DE LLUVIA

CAAMAÑO NEILL GABRIEL,⁽¹⁾
GARCIA, CARLOS MARCELO,⁽²⁾
DASSO, CLARITA MARÍA,⁽³⁾

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

El procedimiento para determinar la variación temporal de las precipitaciones severas, es fraccionar la lámina media, extraída de una función duración-recurrencia (i-d-T), mediante histogramas tipo deducciones de tormentas.

La distribución de eventos de tormenta severos, es que no hay motivos para que los eventos de máxima anual, con los que se determina la i-d-T, coincidan con la persistencia de una sequía abarcando parte de ella, englobando con un lapso sin lluvia o incluir varios.

Los eventos históricos severos a considerar son los intervalos de máxima anual, no las intensas, porque de esta manera los histogramas tipo, además de coincidir en el tiempo con la lámina a distribuir, reflejan los patrones observados, propiedad que no presentan si se usan curvas i-d-T.

Este estudio se identificó (y en algunos aspectos se cuantificó) los errores causados al usar de ese modo, empleando los registros de lluvias de la estación pluviográfica Ceres, en la provincia de Santa Fe, región central de Argentina.

(1) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Centro de la Región Semiarida - Instituto de Hidrología y Meteorología) y Universidad Nacional de Córdoba. cirs@carlospar.com.ar. V° Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ambruso, R et al (1993). The Water Quality Analysis Program, WASP5. Envir. Research Laboratory, Athens, Georgia.
2. Chapra, S (1996). Surface Water Quality Modeling, preliminary edition. McGraw-Hill.
3. DGA (1995). Hidrología Preliminar del Lago Villarrica. Dpto. de Estudios y Planificación.
4. DGA-UACH (1994). Evaluación de la carga de nitrógeno y fósforo en el Lago Villarrica. Dpto. de Estudios y Planificación.
5. Fisher, H et al (1979). Mixing in Inland and Coastal Water. Academic Press.
6. Haktanir, B (1984). Hydrodynamics of Lakes. Instituto de Tecnología, Zurich. CISM.
7. Thomas, R y Jeffrey J (1987). Principles of Surface Water Quality and Management. Prentice-Hall, New York.
8. Vanni, R (1981). Ecología Aplicada. Hoepli, Milán.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XIV CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

HISTOGRAMA PUNTUAL DE DISEÑO: CORRESPONDENCIA ENTRE LA ESTIMACIÓN Y LA DISTRIBUCIÓN DE LA ALTURA DE LLUVIA

CAAMAÑO NELLI, GABRIEL ⁽¹⁾
GARCÍA, CARLOS MARCELO ⁽¹⁾
DASSO, CLARITA MARÍA ⁽¹⁾

RESUMEN

Un procedimiento corriente en diseño hidrológico, para caracterizar la variación temporal interna de precipitaciones severas, es fraccionar la lámina media, extraída de una función intensidad-duración-recurrencia (i-d-T), mediante histogramas tipo deducidos de tormentas intensas.

Esta distribución carece de sustento conceptual, ya que no hay motivo para que los intervalos de máxima anual, con los que se determina la i-d-T, coincidan con la persistencia de una tormenta, pudiendo abarcar parte de ella, englobarla con un lapso sin lluvia o incluir varias.

Los *eventos históricos severos* a considerar son los intervalos de máxima anual, no las tormentas intensas, porque de esta manera los histogramas tipo, además de coincidir en el tiempo con la lámina a distribuir, reflejan los patrones observados, propiedad que no presentan si se derivan de curvas i-d-T.

En este estudio se identifican (y en algunos aspectos se cuantifican) los errores causados al no proceder de ese modo, empleando los registros de lluvias de la estación pluviográfica Ceres, emplazada en la provincia de Santa Fe, región central de Argentina.

⁽¹⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Centro de la Región Semiárida - Instit. Nac. del Agua y del Ambiente) y Universidad Nacional de Córdoba. cirsa@carlospaz.com.ar. V^o Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

1. INTRODUCCION

Las obras de ingeniería destinadas a conducir, regular o sortear cursos superficiales de agua o a contrarrestar sus efectos indeseados se dimensionan en función de la magnitud del evento crítico que deberán soportar. Éste se expresa como una avenida hipotética, la "Creciente de Proyecto", deducida estadísticamente de las mediciones previas de descarga.

Cuando los registros históricos son insuficientes para tal fin, como es habitual, la creciente de proyecto se estima a través de modelos de transformación lluvia-escorrentía y de tránsito, alimentados con un patrón sintético de lluvia, maximizado a nivel de la cuenca de aporte. Esta entrada al sistema hidrológico se denomina "Tormenta de Diseño" y está constituida por tres elementos: 1º) La "lámina de lluvia local", 2º) Su distribución temporal y 3º) Su atenuación espacial. Los dos primeros definen el "hietograma puntual de diseño".

La lámina local es la esperada en un punto del espacio, asumido como centro del fenómeno. Se infiere de un análisis estadístico sobre la intensidad media (i) de las lluvias máximas anuales observadas, para combinaciones de duración (d) y recurrencia (T) dadas, de la siguiente manera: Desplazando un lapso de duración prefijada a lo largo de los registros de cada año hidrológico se ubica el valor máximo de lluvia. Asignando una frecuencia empírica, como la Weibull (Benson, 1962) a cada dato de la serie de máximos anuales, se obtienen luego ternas i - d - T . La función que resulta del ajuste gráfico o analítico de éstas permite estimar la lámina o la intensidad media para valores de duración y recurrencia establecidos por el proyectista (Caamaño y García, 1998).

Como la variación de intensidad en la tormenta (sobre todo la magnitud y posición del pico) define la forma de la crecida que genera, para repartir en el tiempo la intensidad media se pone en juego el segundo elemento de la tormenta de diseño, el "hietograma tipo", que se puede deducir de la relación intensidad-duración-recurrencia (i - d - T) o del análisis de tormentas observadas.

A partir de curvas i - d - T , se extraen láminas de lluvia para la recurrencia adoptada, con sucesivos incrementos de tiempo desde el comienzo del evento, hasta alcanzar la duración prefijada, donde la intensidad media corresponde al valor dado por la curva para esa duración. Un patrón así derivado tiene el máximo en el comienzo, con intensidades decrecientes luego, lo cual en general no refleja la distribución real. Reordenar los intervalos por bloques alternos o el método de intensidad instantánea de Chicago (Keifer y Chu, 1957) tampoco conducen a las características históricas de un tormenta simple, debido a que están constreñidos a formas arbitrarias definidas previamente.

A partir de hietogramas observados es factible sintetizar la variación temporal de tormentas históricas intensas (Hall, 1977). Huff (1967) estima las distribuciones empíricas de frecuencia para porcentajes acumulados de precipitación en un conjunto de tormentas. Existen otras técnicas, como las propuestas por Pilgrim et al. (1969) o por el Soil Conservation Service del U.S. Department of Agriculture (1986) y el método del hietograma triangular presentado por Chow (1994).

Aunque haya que establecer condiciones mínimas (de separación, intensidad media, lámina total) para considerar las tormentas como intensas, así como criterios para agrupar (por duración y/o posición del pico) hietogramas de características similares, y esto introduce subjetividad en el procedimiento, los patrones así obtenidos son más verosímiles. Debido a ello, es práctica común emplear estas tormentas sintéticas para distribuir la lámina extraída de las relaciones i - d - T .

No se advierte, al hacerlo, la incompatibilidad de ambas herramientas. En efecto, no hay razón para que los intervalos móviles, usados al obtener la función intensidad-duración-recurrencia, coincidan con la persistencia real de una tormenta, pudiendo cubrir una pequeña porción de ésta, englobarla junto a un período sin lluvia o agrupar más de un evento.

Aunque se sabe desde hace tiempo que es incorrecto fraccionar la lámina media de lluvia siguiendo formas deducidas de precipitaciones completas (Pilgrim et al., 1975), el procedimiento corriente de trabajo no se ha modificado. Parte de esta inercia es debida a que no se tiene en claro cuáles son las características de los hietogramas que se ven afectadas y en qué medida.

Para subsanar la inconsistencia descrita, en este estudio se realiza la síntesis sobre el mismo lapso, d , en que se estima la intensidad media, llamado "Intervalo de máxima anual" (IMA).

Es decir, los eventos en que se basa el análisis estadístico no son ya las tormentas intensas, sino los intervalos de máxima anual. Los hietogramas locales de diseño, además de coincidir en el tiempo con la lámina a distribuir, representarán entonces los patrones históricos observados, propiedad que no presentan los derivados de curvas i - d - T .

Un contraste de resultados muestra la distorsión global de la distribución y los errores en la magnitud y la posición del pico, al procesar una serie pluviográfica con la metodología habitual.

2. PROCEDIMIENTO

Puesto que se pretende comparar hietogramas correspondientes a dos tipos de eventos, tormentas intensas e intervalos de máxima anual, el primer paso es definir unos y otros.

Caracterizar tormentas intensas involucra tres cuestiones: a) ¿Cuándo una serie de chaparrones sucesivos constituye una tormenta y no varias? b) ¿Qué monto total justifica incluirla en el análisis? y c) ¿Cuál es la tasa media de lluvia requerida para considerarla "intensa"? Es decir, se deben fijar criterios mínimos de corte (tiempo sin lluvia), de lámina y de tasa. Estos valores, siguiendo lo propuesto por Caamaño Nelli et al. (1994), fueron 2 horas, 20 mm y 0,1 mm/min.

Como la distribución de la intensidad depende de la duración de la tormenta, los hietogramas se agruparon en 5 categorías: $d \leq 1$ h; $1 \text{ h} < d \leq 2$ h; $2 \text{ h} < d \leq 3$ h; $3 \text{ h} < d \leq 6$ h y $d > 6$ h (h =horas). La discretización no fue mayor debido a la escasa cantidad de eventos que caía en cada grupo. El criterio de selección no se analiza aquí, pero puede ser discutible dejar de lado la posición del pico.

Por su parte, los hietogramas de IMA no corresponden a rangos sino a valores precisos de duración, adoptados al ubicar láminas máximas anuales para estimar la función i - d - T . Puesto que interesa compararlos con los anteriores, se eligieron de modo que acotaran los rangos de aquellos, es decir, $d = 1/2, 1, 2, 3, 6$ y 24 horas. La elección de los límites extremos (0,5 y 24 horas), para intervalos abiertos, responde a condiciones locales y se justifica más adelante.

Identificados los eventos de ambos tipos de la serie según esos criterios, un análisis inicial permitió comparar sus características individuales antes de la síntesis de patrones típicos.

Para sintetizar patrones de variación temporal interna de eventos históricos severos, tanto de tormentas intensas como de IMA, se desagregó cada uno en un número fijo de intervalos, en este caso sextiles (lapsos de 1/6 de la duración) y se les aplicó el método de Huff.

Dejando de lado análisis locales que avalan este procedimiento frente a otros ya citados (Caamaño Nelli et al., 1994), la relevancia de esta decisión es secundaria, porque el objetivo que aquí se persigue no es evaluar la aptitud de técnicas de síntesis, sino resaltar la incompatibilidad entre la estimación de la lámina de diseño, obtenida de la curva i-d-T, y el procedimiento empleado para distribuirla.

Según el método de Huff (1967), se calculó el porcentaje de lámina sumado por intervalo (sextiles en este caso) de cada histograma histórico y se elaboraron curvas adimensionalizadas (% de lámina acumulada versus % de tiempo). Para cada conjunto de éstas (una duración de IMA o un rango de duración de tormentas intensas) se obtuvo la función empírica de frecuencia acumulada, para una probabilidad prefijada de no excedencia, que en esta aplicación fue de 0,5, es decir la moda.

La desagregación de las funciones de frecuencia proveyó los patrones de distribución (histogramas tipo) por conjunto, que son los utilizados en el análisis comparativo final.

3. DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se empleó una serie de registros pluviográficos de 38 años del período 1955/93, proveniente de la Estación Ceres, aportada por el Servicio Meteorológico Nacional, organismo que la opera. La Estación Ceres está emplazada en la Provincia de Santa Fe, región central de Argentina, a latitud de 29°53' Sur, longitud 61°57' Oeste y altura sobre el nivel del mar de 88 metros.

Tabla 1: Cantidad media de tormentas anuales en Ceres. Período 1955-1993

Duración d	Total	Lámina ≥ 10 mm
0,5h \leq d \leq 1h	32,9	1,4
1h $<$ d \leq 2h	13,9	2,3
2h $<$ d \leq 3h	11,2	3,2
3h $<$ d \leq 6h	17,7	9,4
6h $<$ d	14,5	9,1

En dicho período, la lluvia media fue 888,2 mm/año debida a un promedio de 90 tormentas (con corte mínimo de 2 horas sin lluvia), distribuidas por duración como se indica en la **Tabla 1**.

Si se impone una lámina mínima de 10 mm, el promedio anual se reduce a unas 25 tormentas, el 90 % de las cuales tuvieron duración inferior a 12 horas y menos de una por año superó las 18 horas.

En cambio, con los requisitos exigidos para considerarlas intensas (20 mm y 6 mm/hora) se identifican en la serie 294 tormentas (casi 8 por año). Su duración y su lámina medias fueron 249 minutos y 41,2 mm. Dos tercios de ellas sumaron más del 75 % de la lluvia en su primera mitad.

Se prolongaron entre 28 minutos y 15 horas con 25 minutos, en base a lo cual se establecieron las duraciones extremas referidas con anterioridad.

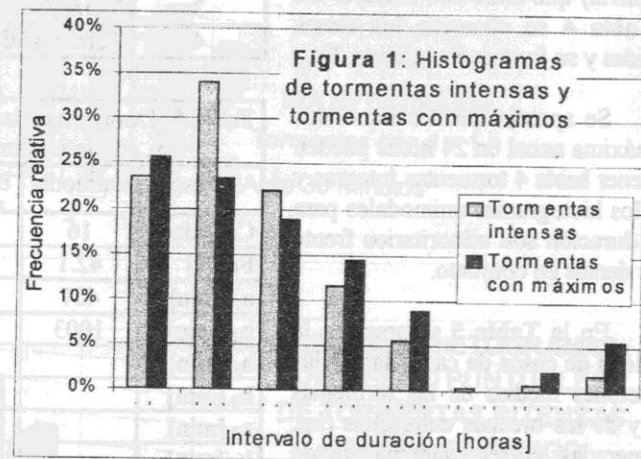
En cuanto a los IMA, se utilizaron en la síntesis un total de 228 histogramas, a razón de 38 máximos anuales para cada una de las 6 duraciones seleccionadas.

4. CORRESPONDENCIAS Y DIFERENCIAS ENTRE EVENTOS

Las tormentas que generan IMA son intensas, exceptuando dos con intensidad media menor que 6 mm/hora. Una incluye los máximos de 0,5 y 1 horas y el otro el de 24 horas.

En la **Figura 1** se muestran los histogramas de frecuencia, de acuerdo a la persistencia, de las tormentas intensas y de las que contienen intervalos de máxima. Dentro de cierta similitud, la segunda distribución es menos empuntada. La lámina media por evento es mayor en las tormentas que generan IMA.

En 12 años hidrológicos (32 % del total de 38) los IMA de las 6 duraciones prefijadas (y los de 1,5 y 12 horas) pertenecieron al mismo evento. En el resto de los períodos de la serie, los máximos correspondieron a distintos episodios lluviosos o estaban conformados por más de un evento.



La **Tabla 2** exhibe las distribuciones promedio de altura de lluvia y tiempo, en tormentas observadas causantes de máximos de intensidad, separándolas en tres períodos: antes, durante y después del intervalo de máxima anual, para duración de IMA ≤ 3 horas, ya que los más extensos suelen contener varias tormentas, lo cual complica el análisis.

Tabla 2: Distribución de tormentas que generan IMA

Duración del IMA	% de lámina caída			% de duración		
	Antes	IMA	Después	Antes	IMA	Después
0,5 hora	11,3	64,3	24,4	17,6	19,9	62,4
1 hora	8,5	79,3	12,2	17,5	40,3	42,2
2 horas	5,2	86,7	8,2	12,5	56,7	30,8
3 horas	1,5	92,2	6,3	6,9	71,4	21,7

Se observa que una elevada proporción del total precipita en el intervalo de máxima y que ello ocurre en un lapso breve respecto a la duración de la tormenta, iniciado antes del 20% de ésta

Como muestra la **Tabla 3**, el tiempo sin lluvia comprendido en un intervalo de máxima anual también es relevante. Al extraer láminas de lluvia de curvas i-d-T, para persistencias de 12 horas, se incluye, en promedio, cerca de la mitad (48,6 %) de la duración sin lluvia, en tanto que para 24 horas cabe esperar que llueva, a lo sumo, en el 60 % del intervalo de máxima (unas 15 horas).

Tabla 3: Porcentaje de la duración del IMA sin lluvia

Duración IMA (horas)	0,5	1	2	3	6	24
Máximo	33,3	25,0	62,5	75,0	87,5	96,9
Promedio	1,3	2,2	18,0	22,6	35,4	70,5
Mínimo	0	0	0	0	0	39,6

Para describir los hietogramas correspondientes a IMA de duración mayor que 3 horas, se los clasificó de acuerdo a la cantidad de tormentas (separadas entre sí por 2 horas o más sin lluvia) que cada uno incluye. En la **Tabla 4** se observan las clases halladas y su frecuencia relativa, Fr .

Tabla 4: Proporción por clase de hietogramas de IMA

Tormentas por IMA	Clase de hietograma	Duración del IMA en horas		
		6	12	24
1	Unimodal	81,6 %	65,8 %	42,1 %
2	Bimodal	18,4 %	31,6 %	36,8 %
3	Trimodal		2,6 %	13,2 %
4	Tetramodal			7,9 %

Se aprecia que los intervalos de máxima anual en 24 horas pueden contener hasta 4 tormentas íntegras y que los hietogramas unimodales para esta duración son minoritarios frente a los demás en conjunto.

En la **Tabla 5** se precisan la cantidad de casos de cada clase y las duraciones medias de las tormentas (a_i) y de las brechas entre ellas (b_i), enumeradas correlativamente desde el inicio del IMA.

Tabla 5: Duración de lapsos con lluvia, a_i , y sin lluvia, b_i , en hietogramas de IMA de 24 horas

Clase	unimodal	bimodal	trimodal	tetramodal
Cantidad	16	14	5	3
Fr [%]	42.1	36.8	13.2	7.9
a_1 [min]	437	239	100	220
b_2 [min]	1003	491	217	185
a_3 [min]		248	132	207
b_4 [min]		462	348	182
a_5 [min]			230	245
b_6 [min]			413	180
a_7 [min]				153
b_8 [min]				68
Σa_i [min]	437	487	462	825
Σb_i [min]	1003	953	978	615

Para el caso unimodal, los valores mínimos de a_1 y b_2 fueron respectivamente 45 y 525 minutos.

En intervalos de 24 horas de duración es donde lucen más claras las diferencias en la variación interna de ambos tipos de eventos históricos severos, que afectan significativamente la forma del hietograma puntual de diseño.

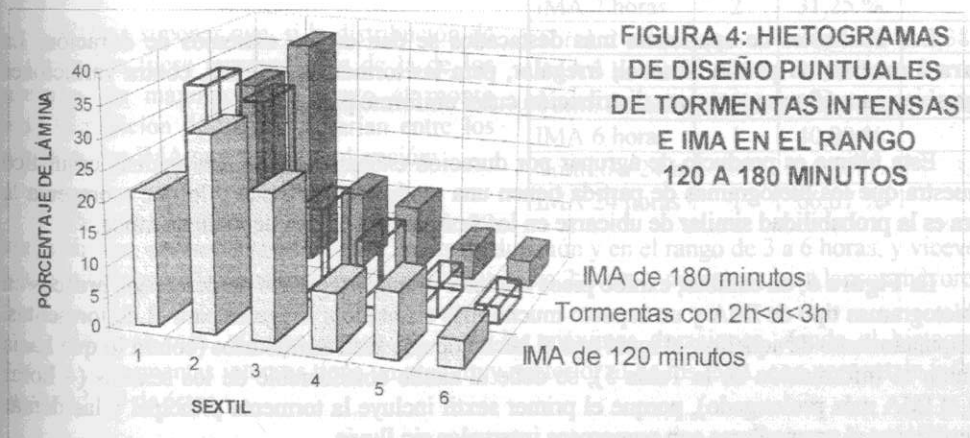
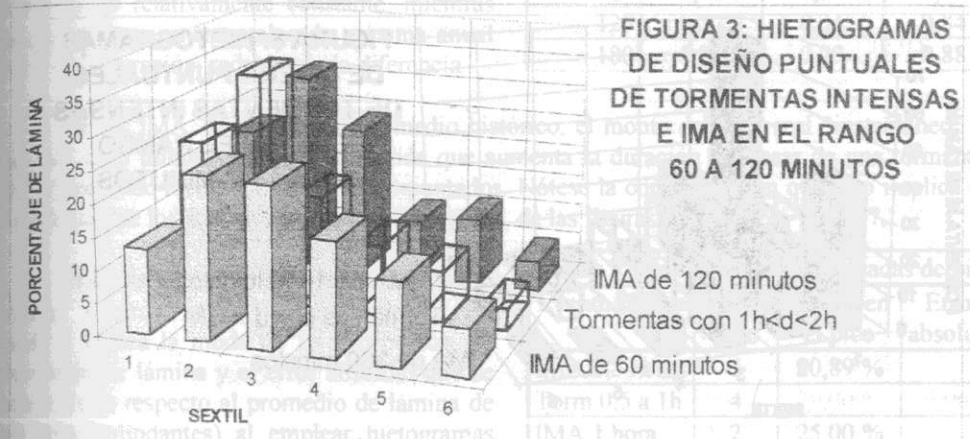
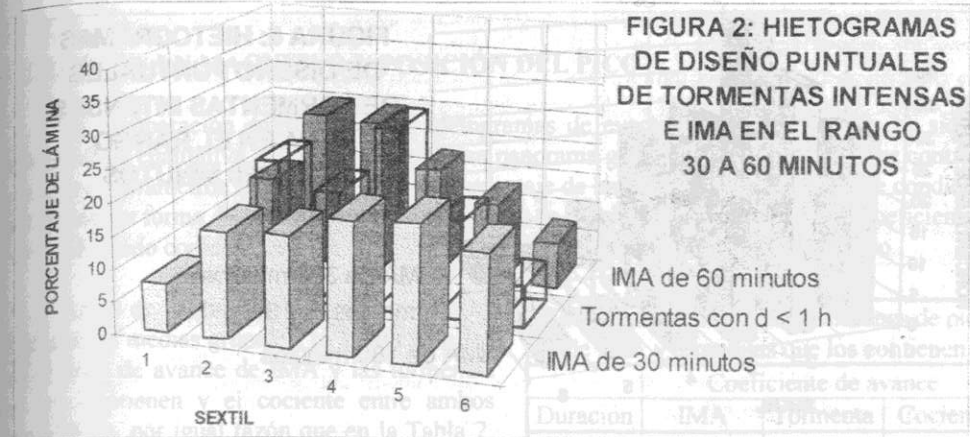
Si se distribuye la lámina tomada de la curva i-d-T con hietogramas de tormentas intensas, se la está repartiendo en 24 horas, cuando debería hacerse en alrededor de 7, según el promedio histórico (**Tabla 3**). Además, se asume de antemano que el hietograma es unimodal, siendo que ésta es solo una de las posibilidades y menos probable que la opuesta (**Tabla 4**).

Cumplido el análisis comparativo de las muestras de 294 tormentas y 228 máximos anuales, se procedió a la síntesis de los patrones temporales de uno y otro tipo de datos.

Las **figuras 2 a 6**, respectivamente, plantean los hietogramas tipo de tormentas intensas para cada uno de los rangos de duración de la clasificación (0,5 a 1 hora, 1 a 2, 2 a 3, 3 a 6 y más de 6), junto con los correspondientes al par de IMA que los delimita, terminando en el de 24 horas.

Este modo de presentación permite contrastar directamente las formas de los productos finales de los dos enfoques que se discuten.

En cuanto a los IMA, se utilizaron en la síntesis un total de 228 hietogramas, a los que se agregaron 38 máximos anuales para cada una de las 6 duraciones seleccionadas.



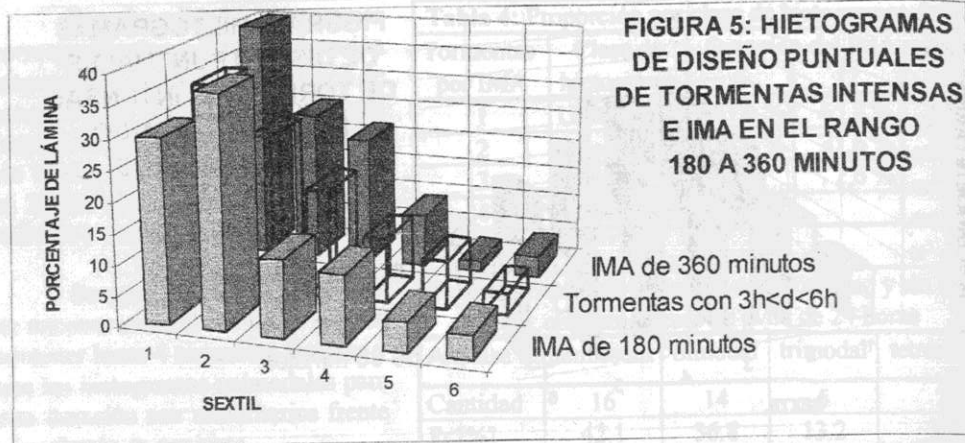


FIGURA 5: HIETOGRAMAS DE DISEÑO PUNTUALES DE TORMENTAS INTENSAS E IMA EN EL RANGO 180 A 360 MINUTOS

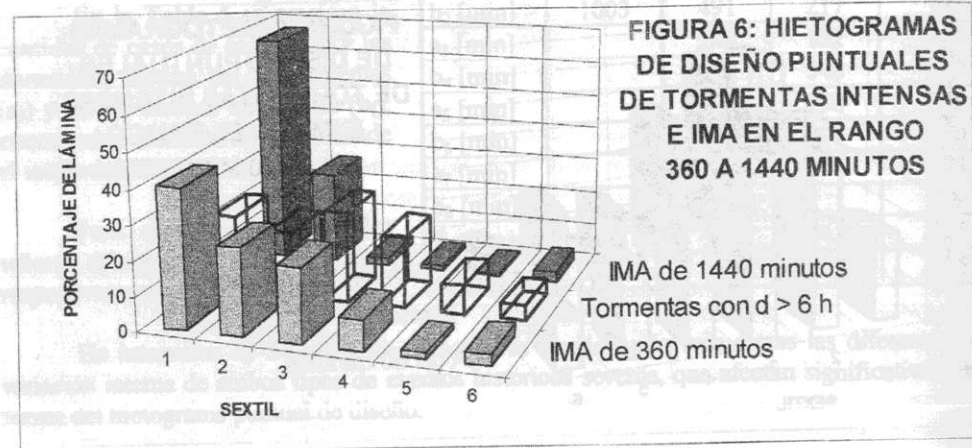


FIGURA 6: HIETOGRAMAS DE DISEÑO PUNTUALES DE TORMENTAS INTENSAS E IMA EN EL RANGO 360 A 1440 MINUTOS

Los contrastes de apariencia más destacados se dan en los extremos de duración. La **Figura 2** muestra un patrón bimodal, irregular, para las tormentas intensas, contra variaciones progresivas para 60 minutos y una distribución casi uniforme para 30.

Esta última es producto de agrupar por duración exclusivamente. Un análisis casuístico demuestra que los hietogramas de partida tienen una moda bien definida y lo que representa la figura es la probabilidad similar de ubicarse en los sextiles 2° a 6° que tiene dicha moda.

La **Figura 6**, en cambio, exhibe picos iniciales grandes seguidos de descensos bruscos en los hietogramas tipo de IMA y un aspecto mucho más achatado e irregular para el de tormentas. El empuntamiento de aquellos, al igual que el hecho de que sean unimodales (contra lo que hacía presumir la información de la **Tabla 5**), se debe al ancho considerable de los sextiles (4 horas para el IMA más prolongado), porque el primer sextil incluye la tormenta principal y las demás se desdibujan al promediarse con numerosos intervalos sin lluvia.

5. ERRORES EN MAGNITUD Y POSICIÓN DEL PICO

La comparación entre formas de hietogramas de eventos severos efectuada ha sido en buena medida cualitativa, tendiente a brindar un panorama general. Para cuantificar ese contraste, los mejores parámetros son la posición y el porcentaje de lámina del pico, ya que éste condiciona fuertemente la forma de la distribución. La posición se puede expresar mediante el coeficiente de avance, definido como el cociente entre el tiempo al pico y la duración total del evento.

Antes de la síntesis de hietogramas tipo, en base a las medias grupales, la **Tabla 6** da los coeficientes de avance de IMA y las tormentas que los contienen y el cociente entre ambos (limitándose, por igual razón que en la **Tabla 2**, a $IMA \leq 3$ horas). Se ve que la moda de las tormentas es relativamente constante, mientras que se adelanta en intervalos de máxima anual al crecer la duración, reduciendo la diferencia.

Tabla 6: Relación entre posiciones de pico de IMA y tormentas que los contienen

Duración	Coeficiente de avance		
	IMA	Tormenta	Cociente
30	0,48	0,27	0,56
60	0,41	0,34	0,83
120	0,37	0,31	0,84
180	0,26	0,23	0,88

En los IMA, de acuerdo al promedio histórico, el monto del pico real "instantáneo" (en realidad, en 5 minutos) decrece a medida que aumenta la duración (al pasar de una tormenta a otra), generando hietogramas menos empuntados. Nótese la contraposición que esto implica con la tendencia de los patrones sintéticos por sextiles, de las figuras 2 a 6 y de la **Tabla 7**.

Pasando a los resultados de la síntesis de eventos severos según ambos enfoques, la **Tabla 7** indica la moda de la distribución, su porcentaje de lámina y el error absoluto que se comete (con respecto al promedio de lámina de los IMA colindantes) al emplear hietogramas tipo de tormentas intensas.

Cabría suponer que, si la distribución de las tormentas fuese representativa de la de los intervalos de máxima anual, tanto el monto como la posición de su pico estarían entre los valores de los IMA que acotan su duración.

Esto se cumple para la localización, no para la lámina, en tormentas de hasta 2 horas de duración y en el rango de 3 a 6 horas, y viceversa en la banda intermedia. Los errores son positivos hasta 2 horas y negativos para lapsos mayores.

Una vez más, el caso crítico es el de las máximas duraciones, donde el hietograma sintético de tormentas intensas tiene un pico muy posterior al de los IMA, con porcentaje inferior a la mitad del de éstos.

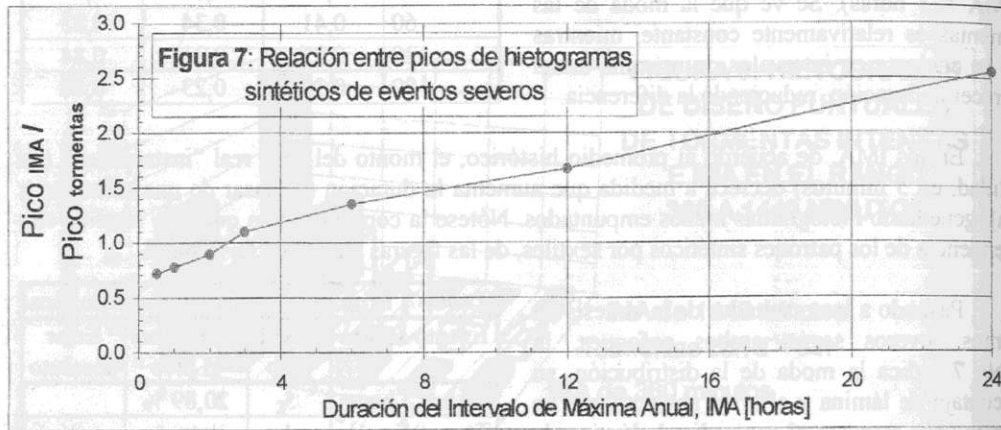
Tabla 7: Errores en las coordenadas de pico

Evento severo	Sextil pico	Lluvia en el pico	Error absoluto
IMA 0,5 horas	5	20,89 %	
Torm. 0,5 a 1h	4	29,00 %	-6,06 %
IMA 1 hora	2	25,00 %	
Torm. 1 a 2 h	2	35,67 %	-7,55 %
IMA 2 horas	2	31,25 %	
Torm. 2 a 3 h	1	34,00 %	-0,38 %
IMA 3 horas	2	37,50 %	
Torm. 3 a 6 h	1	34,00 %	-4,75 %
IMA 6 horas	1	40,00 %	
Torm. 6 a 24 h	3	26,00 %	-27,33 %
IMA 24 horas	1	66,67 %	

Comparando la moda de los intervalos de máxima anual (Tabla 6) con la del hietograma tipo que los representa (Tabla 7), a igualdad de duración, llama la atención la disparidad de ambos guarismos. Por ejemplo, para 0,5 horas, la ubicación en el 5º sextil para el patrón implica un coeficiente de avance entre 0,67 y 0,83, muy distinto del promedio 0,48 de los IMA originales. Sólo hay correspondencia para 3 horas, donde los valores respectivos son 0,17 y 0,33 contra 0,26.

Esto se debe a no haber considerado la posición del pico al agrupar los eventos y, si bien no afecta el contraste de IMA con tormentas intensas (puesto que el criterio de clasificación fue el mismo), debe tomarse en cuenta para trabajar con aquellos.

El cociente entre las modas de hietogramas sintéticos de IMA y tormentas intensas crece a medida que lo hace la duración del intervalo de máxima, como muestra la **Figura 7**. Ésta podría utilizarse para corregir el pico en los casos en que fue tomado del patrón de tormentas intensas, conforme al procedimiento habitual.



6. CONCLUSIONES

- ✓ Un procedimiento corriente en diseño hidrológico, para caracterizar la variación temporal interna de precipitaciones severas, es fraccionar la lámina media, extraída de una función intensidad-duración-recurrencia (**i-d-T**), mediante hietogramas tipo deducidos de tormentas intensas.
- ✓ Esta distribución carece de sustento conceptual, ya que no hay motivo para que los intervalos de máxima anual (**IMA**), con los que se determina la **i-d-T**, coincidan con la persistencia de una tormenta, pudiendo abarcar parte de ella, englobarla con un lapso sin lluvia o incluir varias.
- ✓ Los **eventos históricos severos** a considerar son entonces los **IMA**, no las tormentas intensas, porque los hietogramas tipo, además de coincidir en el tiempo con la lámina a distribuir, reflejan los patrones observados, propiedad que no presentan si se derivan de curvas **i-d-T**.
- ✓ Emplear intervalos de máxima anual en vez de tormentas intensas tiene la ventaja de no exigir criterios mínimos de corte, de lámina y de tasa, eliminando la subjetividad que implica fijarlos.

- ✓ Asumido ese enfoque, se ponen en relieve las consecuencias, sobre el hietograma puntual de diseño, de la falta consistencia entre la estimación de la altura de lluvia y su distribución.
- ✓ Cuando los intervalos de máxima anual duran hasta 2 horas, una elevada proporción del total precipita en el **IMA** y ello ocurre en un tiempo breve respecto a la duración de la tormenta.
- ✓ Al utilizar patrones de distribución de tormentas intensas para estas duraciones, se incrementa el monto relativo del pico en poco más del 20 %.
- ✓ El coeficiente de avance de los patrones de **IMA** es muy superior al de los eventos históricos que representa, por no tomar en cuenta la posición del pico al agruparlos. Si bien no afecta el contraste con tormentas (donde el criterio fue el mismo), esa clasificación debe ser revisada.
- ✓ Por igual motivo, la distribución cuasi uniforme del patrón para 0,5 horas representa una probabilidad similar de la moda de ubicarse en cualquier sextil, no la forma de los hietogramas de partida, que tienen un pico bien definido.
- ✓ Para duraciones mayores que 3 horas, el tiempo sin lluvia en un intervalo de máxima anual es relevante: Al extraer láminas de lluvia de curvas **i-d-T**, para persistencias de 12 horas, se incluye, en promedio, cerca de la mitad de la duración sin lluvia.
- ✓ Las diferencias en la distribución interna de ambos tipos de eventos históricos severos son más nitidas en 24 horas, donde los intervalos de máxima anual pueden contener hasta 4 tormentas íntegras y predominan los hietogramas polimodales (con varios máximos relativos).
- ✓ Si se distribuye la lámina tomada de la curva **i-d-T** con hietogramas de tormentas intensas, se la está repartiendo en 24 horas, cuando, según el promedio histórico, debería hacerse en alrededor de 7 (a lo sumo, 15 horas). Esto reduce el monto relativo del pico en más del 50 %.
- ✓ Las suposiciones de hietograma unimodal y de lluvia permanente, implícitas en los patrones de tormentas intensas, afectan notablemente la forma del hietograma puntual de diseño para duraciones mayores que 3 horas, asignándole un aspecto mucho más achatado e irregular.
- ✓ El carácter unimodal y el empuntamiento de los hietogramas tipo de **IMA** obtenidos indicaría que la discretización es insuficiente para eventos prolongados, porque el primer sextil incluye la tormenta principal y las demás se desdibujan al promediarse con intervalos sin lluvia.
- ✓ Hay una banda de transición, de 2 a 3 horas, donde hay cierta correspondencia de lámina caída, porcentaje de ésta en el pico, moda y forma entre ambos tipos de eventos severos.

En síntesis, se demostró experimentalmente que los patrones sintéticos de tormentas intensas son incompatibles con las láminas extraídas de curvas **i-d-T** que se pretende repartir en el tiempo, en especial para eventos prolongados, donde se introducen errores groseros.

Para sintetizar hietogramas tipo de intervalos de máxima anual, propuestos para distribuir esas láminas, los eventos deberían agruparse previamente por duración y posición del pico y, en el caso de lluvias largas, convendría una discretización mayor que en sextiles.

7. BIBLIOGRAFIA

- BENSON, M.A.; 1962. *Plotting Positions and Economics of Engineering Planning*. Journal of Hydraulics Division. Amer.Society of Civil Engineering. Noviembre.Nº 88,pág 57-71. USA.
- CAAMAÑO NELLI, G.; H. DI BENEDETTO; E. ZAMANILLO; 1994. *Hietogramas Típicos de Tormentas Intensas en la Estación La Suela, Córdoba*. XV Congreso Nacional del Agua. La Plata, Argentina.
- CAAMAÑO NELLI, G.y GARCIA, C. 1998. *Estimación de la Función i-d-T a Escala Regional mediante el Factor de Frecuencia Normal*. II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII Cong. Nac. del Agua. Santa Fe. Argentina. Tomo 2, pp157-167.
- CHOW, V., D.MAIDMENT y L.MAYS; 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia.
- HALL, A. J.; 1977. *Temporal Patterns of Rainfall Bursts*. Australian Rainfall and Runoff. The Institution of Engineers, Australia. Sydney.
- HUFF, F. A.; 1967. *Time Distribution of Rainfall en Heavy Storms*. Water Resources Research, vol. 3, Nº 4, pág. 1007-1019. USA.
- KEIFER, C.J. Y CHU, H.H.; 1957. *Synthetic storm pattern for drainage design*. Journal of Hydraulics Division. Amer.Society of Civil Engineering. Agosto. Vol 83,Nº 4,pp. 1-25. USA
- PILGRIM, D.H.; I. CORDERY y R. FRENCH; 1969. *Temporal Patterns of Design Rainfall for Sydney*. Civil Engineers Transactions, vol. CE 11, Nº 1. The Institution of Engineers, Australia. Sydney.
- PILGRIM, D.H. y I. CORDERY; 1975. *Rainfall temporal patterns for desing flood*. Journal of Hydraulics Division. Amer.Society of Civil Engineering, vol 101, Nº Hy1, pág 81-95. USA.
- U.S.Department of Agriculture Soil Conservation Service. 1986. *Urban Hydrolgy for small watersheds*. Technical release N°55. USA.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA XIV CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA

USO DE REDES NEURONALES PARA LA SIMULACION DE CAUDALES EN CUENCAS PLUVIALES

XIMENA VARGAS M.¹
PABLO ANGUITA M.²

RESUMEN

Con la finalidad de mejorar los sistemas de predicción existentes en el país, se estudia la aplicabilidad de la metodología denominada redes neuronales al pronóstico de caudales medios diarios en cuencas de régimen pluvial de la zona central de Chile. Esta metodología que consiste en un sistema experto que modifica su comportamiento para adaptarse a las condiciones que se van produciendo, utiliza relaciones y combinaciones entre las neuronas de las distintas capas que conforman la red, lo que permite modelar el fenómeno precipitación escorrentía.

¹ Ingeniero Civil. Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile

² Ingeniero Civil. Universidad de Chile